

위성 카메라의 틸트 효과를 고려한 온라인 리포커싱 알고리즘

이다현¹ · 황재혁^{2,†} · 홍대기²¹국방기술품질원 선행연구계획팀²한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

Online Refocusing Algorithm Considering the Tilting Effect for a Small Satellite Camera

Da Hyun Lee¹, Jai Hyuk Hwang² and Dae Gi Hong²¹Defence Agency for Technology and Quality, Precedent Study Planning Team²Dept. of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University

Abstract

Small high-resolution Earth observation satellites require precise optical alignment at the submicron level. However, misalignments can occur due to the influence of external factors during the launch and operation despite the sufficient alignment processes that take place before the launch. Thus, satellites need to realign their optical elements in orbit in what is known as a refocusing process to compensate for any misalignments. Refocusing algorithms developed for satellites have only considered de-space, which is the most sensitive factor with respect to image quality. However, the existing algorithms can cause correction error when inner and external forces generate tilt amount in an optical system. The present work suggests an improved online refocusing algorithm by considering the tilting effect for application in the case of a de-spaced and tilted optical system. In addition, the algorithm is considered to be efficient in terms of time and cost because it is designed to be used as an online method that does not require ground communication.

초 록

고해상도 지구관측 위성의 성공적인 임무 수행을 위하여 궤도 진입 후 리포커싱 과정은 필수적으로 요구된다. 마이크론 단위의 정밀한 광학 정렬을 요하는 광학 위성카메라는 발사 전 충분한 정렬 과정을 거치지만 발사 및 운용 과정에서 외부 환경에 의한 광부품의 정렬오차가 발생하게 된다. 기존의 지구관측 위성들은 지상과의 통신을 통한 오프라인 방식의 리포커싱을 수행해왔으며 이는 비용·시간적 측면에서 비효율적이다. 따라서 본 논문에서는 궤도 상에서 자동초점 정렬과정이 수행되는 온라인 리포커싱 알고리즘을 제안하였다. 또한 부경의 틸팅에 따른 광학적 효과를 리포커싱 알고리즘에 적용하여 디스페이스 외 틸팅이 발생한 위성카메라에도 적용되도록 개발하였다. 리포커싱 알고리즘의 개발 및 성능평가를 위하여 실험실 수준의 광학계를 설계하였으며, 이를 기반으로 데이터를 추출하여 부경 정렬오차에 따른 MTF(Modulation Transfer Function) 경향성을 파악하였다. MTF 경향성을 바탕으로 궤도상에서의 De-space VS MTF 함수를 추정하여 알고리즘을 개발하였다. 리포커싱 알고리즘의 성능 평가는 MATLAB과 CODE V의 연동 시뮬레이션을 통하여 수행되었다.

Key Words : Refocusing(리포커싱), Autofocusing(오토포커싱), Self-focusing(셀프-포커싱), Small Satellite Camera(소형 위성카메라), MTF assessment(MTF 평가)

1. 서 론

지구관측 위성시장은 국방 및 민수용 수요 증가로 인하여 높은 성장세를 보이고 있다[1]. 최근 비용 절감을 위한 저가형 고해상도 소형 지구관측 위성의 개발이 증가하는 추세이다. 소형 위성은 개발소요기간이

짧고 비용 절감에 유리하며 구조가 보다 단순하여 시스템 구성이 용이하다. 또한 다수의 위성으로 위성군을 구성할 경우 전체적인 시스템의 활용도나 신뢰도 또한 높일 수 있는 장점을 갖고 있다. 이에 따라 해상도 증대를 위한 소형위성의 군집비행 및 편대비행 기술 개발도 진행되고 있다[2, 3].

그러나 소형 위성의 경우 구조적으로 외부 영향에 취약하다는 단점이 있다. 발사 시의 진동환경과 우주 환경에서 열탄성효과 및 수분토출 등의 영향은 소형 위성 광학구조체에서 광학 부품의 변형을 야기할 수 있다. 특히 위성의 주반사경과 부반사경의 정렬 오차는 영상 품질에 중요한 영향을 끼친다. 주경과 부경 사이의 상대위치를 유지하는 기계 구조부를 미터링 구조라 부른다[2]. 미터링 구조는 주경과 부경의 초기 위치를 수 μm 이내로 항상 유지해야 한다[3]. 하지만 저가형 소형 위성의 경우 미터링 구조의 강성에 한계가 있어 초기 정렬도를 유지하는 데에 어려움이 있다. 미터링 구조의 강성 및 치수안정성에 따라 발생한 정렬오차는 운용 초기와 이후 정기적인 보정을 거치게 되는데, 이를 리포커싱 과정이라 한다. 현재 운용되는 대부분의 소형 고해상도 광학 위성카메라는 영상 품질을 보장하기 위해 리포커싱 과정을 거친다. Figure 1에 리포커싱 과정을 표현하였다.

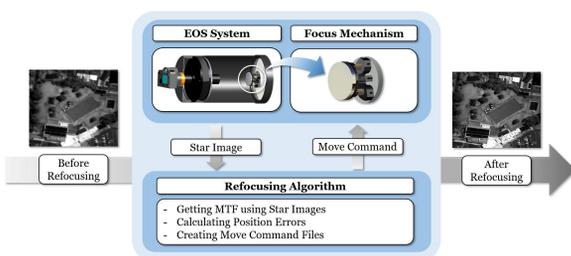


Fig. 1 Schematic of the Refocusing Process

앞서 언급한 정렬오차는 틸트, 디센터, 디스페이스의 3종류가 있다(Figure 2). 디스페이스란 주경에 대한 광학 요소의 광축방향으로의 정렬오차를 의미하며, 틸트란 주경과 광학요소 사이의 각도가 발생하는 것을 의미한다. 또한 디센터는 광학 요소의 중심이 광축에서 벗어나는 것을 말한다. 일반적으로 광학성능에 미치는 영향이 가장 큰 정렬오차는 디스페이스이므로 대부분의 상용 위성들은 오직 디스페이스에 대한 리포커

싱을 수행하고 있다.

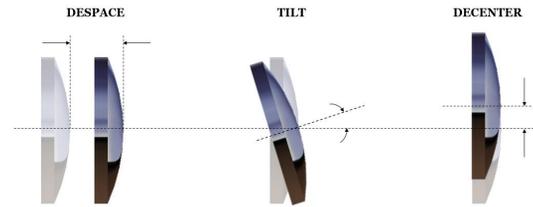


Fig. 2 Definition of Misalignments of Optical System : Despace, Tilt, Decenter

위성카메라의 궤도상 리포커싱을 최초로 제안한 것은 1984년 SPOT 위성을 발사한 CNES(Centre National d'Etudes Spatiales)이었다[4]. 이후 1994년에는 임무를 마친 SPOT1 위성의 HRV(High Resolution Visible) 카메라 리포커싱을 성공적으로 수행하였다. 2002년에는 SPOT5 위성의 두 개의 HRG(High Resolution Geometric) 카메라를 이용하여 MTF를 추출하는 방식을 제시하고 HRG와 HRS(High Resolution Stereoscopic) 카메라의 리포커싱을 수행하였다[5]. CNES는 2011년 발사된 Pleiades 위성에서도 별 영상의 PSF(Point Spread Function)의 푸리에 변환을 통해 MTF를 측정하여 리포커싱을 수행하였다. 포커스 메커니즘의 이동으로 여러 지점에서의 MTF를 측정 후 정점을 피팅하는 방식을 택하여 정확한 정렬이 수행되도록 하였다[6]. 궤도상 리포커싱은 고해상도 위성에 대하여 수차례 수행되었으나 리포커싱 방법에 대한 연구 내용은 보안의 문제로 대부분 공개되지 않고 있다. 리포커싱을 수행하는 포커스 메커니즘에 대한 연구는 EUMETSAT(European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites)의 Meteosat Second Generation(2002), NASA의 Space Spitzer Telescope(2003), Satrec Initiative 의 DubaiSat(2009) 및 Deimos-2(2009), KARI (Korea Aerospace Research Institute)의 KOMPSAT-3(2012) 등의 위성에 관련하여 공개되어 있다[7-11].

기존 위성에 적용된 리포커싱은 지상과의 통신을 통하여 수행되어 왔다. 운용 궤도에 도달한 위성이 수차례 촬영된 영상을 지상 관제국으로 전송하면, 관제국

인력이 영상을 분석하여 위성으로 부정 위치 이동 명령을 전송한다. 일련의 과정은 위성영상의 품질이 최고치에 이를 때 까지 반복된다. 이러한 과정을 오프라인 리포커싱 방식이라 한다. 이러한 방식은 지상관제국에 일련의 과정을 수행하기 위한 전문 인력이 요구되며 데이터 처리 과정에서 시간 지연이 발생한다. 따라서 오프라인 리포커싱 방식은 소요 시간·비용 측면에서 비효율적이다.

이러한 단점을 보완하기 위해 기존에 조정빈 외 2명은 온라인 리포커싱 알고리즘을 제시한 바 있다[13]. 온라인 리포커싱이란 지상관제국과의 통신 없이 궤도상에서 자동으로 보정 위치를 추정하여 정렬을 수행하는 것을 말한다. 지상과의 통신이 불필요하므로 오프라인 리포커싱 방식의 단점을 보완할 수 있고, 보다 적은 영상 촬영으로 빠른 위치 보정을 가능하도록 한다.

본 논문에서 제안한 알고리즘은 디스페이스 뿐 아니라 틸트의 영향도 함께 고려한 온라인 리포커싱 알고리즘이다. 종래의 오프라인 리포커싱 방식의 단점을 보완하기 위하여 온라인 리포커싱 방식을 택하였다. 온라인 리포커싱 알고리즘은 포커스 메커니즘과 연동되어 정렬을 수행한다. 알고리즘 구동에 필요한 영상 촬영을 최소화하도록 개발하여 소요 시간 및 전력 소모를 줄여 리포커싱 과정의 효율성을 높이도록 하였다.

본 알고리즘이 기존의 온라인 리포커싱 알고리즘과 차별화된 점은 틸트가 발생한 광학계에도 적용될 수 있도록 고안되었다는 것이다. 진동, 충격 등이 발생하는 발사환경 및 극저온과 열진공 등의 우주환경은 위성카메라에 정렬오차를 발생시킨다. 이때 정렬오차는 디스페이스 외에도 틸트가 발생할 수 있으나 기존에 틸트가 발생한 광학계에 대하여 리포커싱을 수행하는 알고리즘에 대한 연구 내용은 발표된 바 없다. 틸트가 발생한 광학계에 기존의 온라인 리포커싱 알고리즘을 적용하면 보정 오차가 발생하여 정렬이 제대로 이루어지지 않는다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 틸트에 의한 광학적 영향을 고려하여 알고리즘을 개발하였다. 이는 특히 외부 영향에 구조적으로 취약한 소형 위성에 적용하기에 적합하다.

알고리즘 개발 및 성능평가를 위하여 먼저 목표 광

학계 설계가 수행되었으며, 설계한 광학계의 디스플레이스와 MTF 관계를 분석하였다. 수집한 데이터의 커브피팅을 수행하여 함수 특성을 파악하고 이를 수식으로 나타내었다. 제안된 알고리즘은 이 수식을 기반으로 현 위치에서의 디스페이스 값을 수치적으로 계산하여 보정 위치를 추정한다. MATLAB과 CODE V의 연동 시뮬레이션을 통하여 보정 메커니즘의 이동과 광학 성능 추출을 전산모사 함으로서 알고리즘의 성능을 검증하였다.

2. 목표 광학계 설계

알고리즘 개발 및 성능평가를 위하여 목표 광학계 설계를 수행하였다. 광학 설계는 광학계 사양 선정, 광학계 설계, 성능 분석 순으로 이루어진다. 위성 카메라는 이용 목적에 따라 카메라 해상도, 관측 대역, 관측 폭, 관측 고도 등의 규격이 결정된다[13]. 목표 광학계의 설계 사양을 결정하기 위하여 주반사경의 크기를 소형으로 전제하고 위성카메라의 주요 규격과 제한 사항을 제시하여 이에 따른 광학 설계와 성능 분석 결과를 제시하였다.

2.1 목표 광학계 사양

본 연구에서 설계한 광학계는 추후 실제 시스템을 구성하여 알고리즘의 성능을 검증할 수 있도록 실험실 수준의 광학계 설계를 목표로 하였다. 따라서 광학계 설계 시 제작 및 조립의 용이성, 소요 비용과 시간을 고려함이 요구된다. 또한 본 연구에서 다루는 소형위성은 주경 200 mm급의 크기와 무게를 갖는 광학계를 탑재한다고 가정하였다. 따라서 광학계가 주경 200 mm를 가지며 가시광선 대역(480~650 nm)에서 2.8 m의 지상표본거리와 관측 폭 12 km을 가지도록 기본 사양을 설정하였다. 대부분의 소형 위성은 발사 시 비용 절감을 위하여 주로 더부살이(Piggyback) 방식으로 발사되므로 이를 고려하여 운용 고도는 원격탐사 위성이 갖는 전형적인 고도 685 km로 정하였다[12].

광학계 전자부의 경우 비용 절감과 광학계 구성의 용이성을 위하여 상용 디지털 SLR 카메라의 센서를 사용하였다. 기존 위성카메라에 사용되는 센서는 주롤라인 형태의 1차원 센서이나 최근 일부 저가형 소형위성의 경우 비용 절감을 위해 면적 형태의 상용 2차원

센서를 사용한다. 설계에 사용된 센서는 Cannon社의 EOS-1D Mark 3 CMOS 센서로 하나의 픽셀 크기는 8.2 μm 이다.

영상 품질을 판단하는 지표로는 MTF를 사용하였으며, MTF가 나이퀴스트 주파수(약 60 lines/mm)에서 전체 광학 시스템 구성 후 최종 성능이 10% 이상을 만족하도록 목표치를 설정하였다[13]. 따라서 광학계의 전자부 시스템의 MTF를 40%로 가정하고 제작 및 조립에 의한 MTF 저하를 고려하여 목표 광학계의 설계 성능은 30% 이상이 되도록 하였다. 목표 광학계의 주요 설계 사양은 Table 1에 정리하여 나타내었다.

Table 1 Optical Design Requirements

Item	Features	
Diameter	200 mm Aperture Dia.	
Spectral Range	480 ~ 650 nm, Multi Spectral	
Altitude	685 km	
GSD	2.8 m	
Swath Width	12 km	
Detector	Size	28.7 mm × 19.1 mm (3520 × 2336)
	Type	CMOS
	Pixel size	8.2 μm × 8.2 μm for MS
MTF	≥ 10%, @EOS, Nyquist Freq. ≥ 30%, @Optical Design, Nyquist Freq.	
FOV	± 0.5 °	
EFL	1968 mm	
F/#	10	

2.2 목표 광학계 설계

광학계의 설계는 앞서 선정된 설계 사양(Table 1)을 구체적으로 구현하기 위한 과정이다. 본 연구에서 광학 설계는 광학 설계 프로그램인 CODE V를 이용하여 수행되었다. 일반적으로 광학계의 성능을 평가하기 위해 사용되는 지표에는 MTF, 스팟 선도(Spot Diagram), Field Curves 등이 있다. 설계한 광학계의 성능을 확인하기 위하여 앞서 설명한 지표를 기준으로 그래프와 수치를 도시하였다.

지구관측 위성에 사용되는 광학카메라에는 크기와 무

계의 제약으로 주로 카세그레인 방식이 사용된다[14]. 본 연구에서 설계하고자 하는 광학계 유형은 카세그레인 방식에 슈미트 판을 추가로 구성한 슈미트-카세그레인 방식으로 선정하였다. 슈미트-카세그레인 방식의 망원경은 유효초점거리에 비해 경통 길이가 짧아 설계 시 소형화가 유리한 카세그레인 방식의 장점을 가지며, 동시에 구면수차, 코마수차, 비점수차를 슈미트 판을 통해 보정함으로써 광학 성능을 향상시킨다. 이 방식은 좁은 시야를 갖는다는 단점을 갖고 있으므로 이에 따른 상면 만곡을 보상하기 위해 2개의 렌즈로 구성된 1군의 필드 플래트너를 추가로 설계하였다. 모든 광학 요소의 배열을 평행하도록 설계하여 조립 및 정렬이 용이하도록 하였다. Figure 3은 정축 슈미트-카세그레인 방식의 광학계에 부경 포커스 메커니즘을 적용한 구조를 나타낸다.

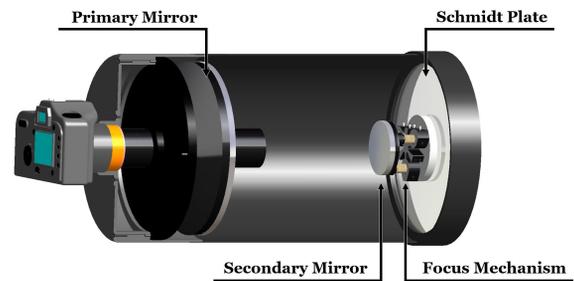


Fig. 3 Structure of Schmidt-Cassegrain Type Telescope with Focus Mechanism

광학계 설계 시 경통 길이, 부반사경에 의한 차폐, 포커스 메커니즘 설치 공간 확보 등의 사항을 중요하게 고려하였다[14]. 목표 광학계 설계 목표는 소형 위성용 고해상도 위성카메라이므로 주경의 크기가 고정되어 있을 때 경통 길이가 짧을수록 유리하다. 또한 발사체에 탑재할 때 무게와 부피의 제약을 고려하여 슈미트판으로부터 이미지 면까지의 길이, 즉 총 광학계 길이는 500 mm 이하가 되도록 설계하였다.

정축 슈미트-카세그레인 방식의 광학계에서 중앙 차폐(Central Obstruction)에 의한 성능저하를 줄이기 위하여 부경의 크기를 작게 설계하였다. 중앙 차폐란 부경과 그 지지구조에 의해 광학계로 들어오는 빛이 차단되는 현상을 말하며 이로 인하여 광학계 내부로 들어오는 광량이 감소하고 이미지의 콘트라스트가 감

소하는 영향을 미친다. 따라서 일반적인 슈미트-카세그레인 타입의 설계 사양을 고려하여 지름비는 35%이하를 만족하도록 설계하였다.

리포커싱 알고리즘은 포커싱 메커니즘과의 연동을 통해 구동되므로 광학계에 포커스 메커니즘의 설치가 필요하다. 슈미트-카세그레인 방식의 광학계에서는 필드 플래너 및 슈미트 판에 비하여 부경의 정렬오차에 의한 광학성능의 민감도가 가장 크다[12]. 광학계 구성요소의 정렬 시 광학 성능에 가장 민감한 것은 부경의 위치이다. 따라서 가장 민감한 요소인 부경에 포커싱 메커니즘을 설치하여 작은 양의 위치이동으로 효율적인 보정이 가능하도록 하였다. 알고리즘 구동을 위한 포커스 메커니즘의 설치를 위하여 필요한 제한조건을 결정하였다. 통상 슈미트-카세그레인 타입의 광학계에서 부경은 슈미트판의 뒤쪽에 부착된다. 또한 슈미트판과 부경의 거리는 포커스 메커니즘이 내부에 포함된 거리이다. 설계하고자 하는 광학계가 구조적으로 취약한 소형위성에 탑재됨을 고려하여 리포커싱 과정에서 보정 가능 범위를 $\pm 30\mu\text{m}$ 로 충분히 선정하였다. 그 외에 주경을 지지하는 구조물의 위치를 고려하여 초점부에서 이미지 센서 설치가 용이하도록 하였고, 이미지의 왜곡이 1% 이하를 만족하도록 설계하였다. Figure 4 광학 설계가 완료된 광학계를 나타내었다.

lines/mm 에서 0 field/1 Field 각각 39.7%/36.5%로 요구도인 30% 이상을 만족하는 것을 확인하였다. 또한 그림에서 MTF 선도가 회절한계선에 근접하게 설계되었음을 알 수 있다. Figure 4(b)의 Spot Diagram에서 1 Field에서의 RMS 값은 $6.5\mu\text{m}$ 로 CMOS 센서의 한 픽셀 크기인 $8.2\mu\text{m}$ 내에 들어오는 것을 확인하였다. Figure 4(c)의 Field Curves에서 상면만곡이 크지 않음을 확인할 수 있으며 상의 왜곡은 1 Field에서 최대 0.97%로 나타났다. Figure 4(d)는 설계한 광학계의 3D 형상을 나타내며 설계한 광학계의 슈미트판과 부경 사이 거리가 55 mm, 부경 차폐비가 30%, 그리고 광학계 길이가 490 mm로 설계 요구조건을 만족하였다.

3. 틸트를 고려한 온라인 리포커싱 알고리즘

실제 위성에 적용된 리포커싱 기술 중 기존에 공개된 것은 다음과 같다. CNES의 SPOT-5 위성의 경우 두 개의 HRG 카메라를 이용하여 지상의 같은 목표물을 촬영하여 두 카메라의 MTF 비율 모델을 이용하여 리포커싱을 수행하였다. CNES의 Pleiades의 경우 두 가지 리포커싱 방법을 제안하였는데, 첫 번째 방법은 광학계의 전달함수가 센서 전달함수와 디포커스 전달함수의 곱으로 근사됨을 이용하여 디스페이스 값을 추정하는 방법이며, 두 번째 방법은 포커스 메커니즘으로 부경의 위치를 이동하여 각 위치에서의 MTF를 추출하고 이를 커브 피팅하여 정점을 찾아내는 방식을 제시하였다[15].

이러한 단점을 보완하기 위하여 조정빈 외 2명은 별 영상 촬영을 통하여 MTF를 추출하고, 추출한 데이터를 De-space VS MTF 함수에 적용하여 디스페이스 값을 추정하는 알고리즘을 제안하였다[13]. 이러한 온라인 리포커싱 방식은 지상관제국과의 데이터 송수신이 필요치 않으므로 시간·비용적 측면에서 효율적이다. 이에 따라 온라인 방식은 다양한 부가적 효과를 얻을 수 있다. 위성카메라는 운용 초기 뿐 아니라 주기적으로도 리포커싱이 요구되므로 위성에 리포커싱 알고리즘을 탑재할 경우 효율적인 이미지 품질 관리가 가능해진다. 또한 위성 군집 비행(Satellite Constellation 또는 Cluster)이나 편대비행(Formulation Flying)을 통해 지구관측을 할 때 온라인 리포커싱 기술은 다수

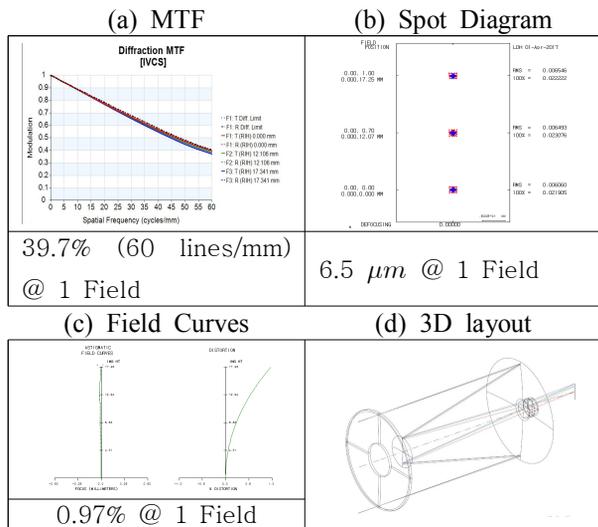


Fig. 4 Performance of the Designed Optical System

Figure 4(a)의 MTF 선도에서 Nyquist 주파수 60

의 위성을 효율적으로 관리하기에 매우 적합하다. 또한 이러한 온라인 리포커싱 알고리즘의 실효성은 알고리즘을 구동하기 위한 포커스 메커니즘에서 찾을 수 있다. 충분한 해상력을 지닌 우주용 구동기와 센서가 구성이 된다면 리포커싱 알고리즘의 구현은 가능할 것이라 판단된다.

현재까지 문헌에 공개된 온라인 알고리즘은 디스페이스가 발생한 위성 광학계에 대하여 연구되었다. 그러나 틸트와 디스페이스가 동시에 발생한 광학계에 기존 알고리즘을 적용하면 보정 오차가 발생하게 된다. 따라서 본 연구에서는 온라인 리포커싱의 장점을 가지며 디스페이스 뿐 아니라 틸트가 발생한 경우에도 적용할 수 있는 강인한 리포커싱 알고리즘 개발을 목적으로 하였다. 전체 알고리즘은 CODE V를 활용하여 설계한 광학계의 정렬오차에 따른 MTF 데이터를 추출하고 이에 따른 경향성을 분석하여 고안되었다. CODE V와 MATLAB의 연동 시뮬레이션을 통해 기존 알고리즘과 제안된 새로운 알고리즘의 성능을 비교 분석하였다.

3.1 틸트 및 디스페이스의 영향

디스페이스 및 틸트와 광학 성능의 관계를 파악하기 위하여 설계된 광학계에 대하여 MTF 데이터를 수집하였다. 데이터 수집은 CODE V에서 부경에 가상 정렬오차를 부여하여 MTF 데이터를 얻는 방식으로 수행되었다. 데이터 추출 범위는 앞서 설정한 알고리즘의 보정 가능 범위를 따른다.

먼저 디스페이스 발생에 따른 광학계의 성능 저하 경향성을 파악하기 위하여 디스페이스가 발생하였을 때의 Radial MTF 데이터를 수집하였다. 3절에서 다루는 MTF 데이터는 Radial MTF만을 다루었으므로 간단히 MTF로 표현한다. 디스페이스에 따른 MTF 데이터는 Figure 5에 나타내었다.

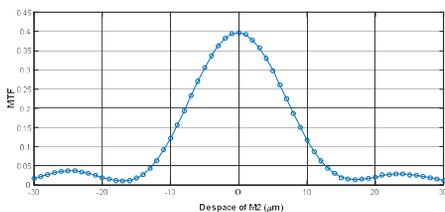


Fig. 5 MTF VS De-space of M2

Figure 5의 x축은 초점위치를 기준으로 부경의 디스페이스 값을 나타내며 y축은 해당 위치에서의 MTF를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 MTF 값이 $\pm 11\mu m$ 범위를 벗어난 경우 미소 변동(Fluctuation)이 발생한다. 이 변동은 이산형 데이터를 연속형 데이터로 변환하기 위하여 커브 피팅을 수행할 때 오차를 증가시킨다. 따라서 커브 피팅 시 데이터 사용 범위는 $-11\mu m$ 에서 $11\mu m$ 로 제한하였다. 또한 실제 데이터와 커브 피팅 함수의 잔차제곱합(SSE:Sum of Square of Error) 및 평균제곱근오차(RMSE:Root Square of Error)를 고려하여 2차 푸리에 급수 모델로의 커브 피팅을 수행하였다. 2차 푸리에 급수 모델은 식 (1)과 같다.

$$f(x) = a_0 + a_1\cos(wx) + b_1\sin(wx) + a_2\cos(2wx) + b_2\sin(2wx) \quad (1)$$

다음으로 틸트에 의한 광학 성능 영향을 고려하기 위하여 광학계에 Table 2의 7가지 경우에 대하여 De-space VS MTF 데이터를 수집하였다. 수집한 데이터의 커브 피팅을 수행하여 Figure 6에 나타내었다.

Table 2 7 Cases of Tilted Optical System

Case 1	틸트가 발생하지 않은 경우
Case 2	α 각 틸트 $100\mu rad$ 이 발생한 경우
Case 3	α 각 틸트 $200\mu rad$ 이 발생한 경우
Case 4	β 각 틸트 $100\mu rad$ 이 발생한 경우
Case 5	β 각 틸트 $200\mu rad$ 이 발생한 경우
Case 6	α 각과 β 각 틸트 $100\mu rad$ 이 발생한 경우
Case 7	α 각과 β 각 틸트 $200\mu rad$ 이 발생한 경우

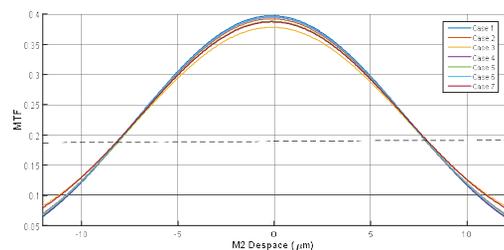


Fig. 6 MTF VS De-space of M2 @ Case 1~7

Figure 6의 점선은 각 함수들의 교점을 연결한 1차

함수이다. 이 함수를 기준으로 디스페이스-MTF 함수들은 틸트가 발생함에 따라 개형은 유지하며 진폭이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 함수 특성을 바탕으로 임의의 틸트가 발생한 광학계의 디스페이스-MTF 함수를 추정하기 위하여 다음과 같이 정의한다. 디스페이스 값이 x 일 때, 틸트가 발생하지 않은 광학계의 커브 피팅 함수를 $f_0(x)$, 틸트가 δ 만큼 발생한 광학계의 커브 피팅 함수를 $f_\delta(x)$, 디스페이스-MTF 함수들의 교점을 연결한 1차 함수를 $f_l(x)$ 로 정의한다. 이 때 $f_0(x)$ 와 $f_l(x)$ 는 아는 함수이며 $f_\delta(x)$ 는 모르는 함수이다. 정의한 $f_0(x)$ 와 $f_l(x)$ 의 함수식을 각각 식 (2)와 식 (3)에 나타내었다.

$$\begin{aligned} f_0(x) = & 0.1449 + 0.1892\cos(0.1393x) \\ & - 0.0013\sin(0.1393x) + 0.0631\cos(0.2786x) \\ & - 0.0033\sin(0.2786x) \end{aligned} \quad (2)$$

$$f_l(x) = 1.933e - 4x + 0.1894 \quad (3)$$

앞서 언급한 특성에 근거하여 보정 범위 내 임의의 위치 x 에 대하여 $f_\delta(x)$ 를 다음과 같이 근사할 수 있다.

$$f_\delta(x) = k[f_0(x) - f_l(x)] + f_l(x) \quad (4)$$

식 (4)의 미지수는 디스페이스 값 x , 진폭비 k 로 총 2가지이다. 미지수인 진폭비 k 를 제거하고 디스페이스 값 x 를 구하기 위하여 식 (4)를 임의의 위치 x_1 과 x_2 에 대한 2차 연립방정식으로 나타낸다.

$$f_\delta(x_1) = k[f_0(x_1) - f_l(x_1)] + f_l(x_1) \quad (5.a)$$

$$f_\delta(x_2) = k[f_0(x_2) - f_l(x_2)] + f_l(x_2) \quad (5.b)$$

식 (5)의 미지수 k 를 제거하면 식 (6)을 유도할 수 있다.

$$\frac{f_\delta(x_1) - f_l(x_1)}{f_\delta(x_2) - f_l(x_2)} = \frac{f_0(x_1) - f_l(x_1)}{f_0(x_2) - f_l(x_2)} \quad (6)$$

식 (6)을 정방정식으로 표현하기 위하여 양변에 분모의 최소공배수를 곱하여 정리한 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & [f_\delta(x_1) - f_l(x_1)][(f_0(x_2) - f_l(x_2))] \\ & - [f_\delta(x_2) - f_l(x_2)][(f_0(x_1) - f_l(x_1))] = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

식 (7)에서 미지수와 식의 개수를 일치시키기 위하여 x_1 과 x_2 의 관계를 다음과 같이 부여한다.

$$x_2 = x_1 + 1 \quad (8)$$

식 (8)의 관계가 성립하는 디스페이스 값 x_1 과 x_2 에 대한 $f_\delta(x_1)$ 과 $f_\delta(x_2)$ 가 주어지면 식 (7)의 풀이가 가능하다. 식 (8)을 식 (7)에 대입하여 하나의 미지수 x_1 에 대하여 정리한 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & [f_\delta(x_1) - f_l(x_1)][(f_0(x_1+1) - f_l(x_1+1))] \\ & - [f_\delta(x_1+1) - f_l(x_1+1)][(f_0(x_1) - f_l(x_1))] = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 $f_\delta(x_1)$ 과 $f_\delta(x_1+1)$ 은 위치 x_1 , x_1+1 에서의 MTF 값을 의미한다. 해당 위치로의 이동은 포커스 메커니즘의 구동을 통하여 이루어질 수 있다. 즉 부경의 현재위치와 $+1\mu m$ 이동한 위치에서의 MTF 데이터 추출로 $f_\delta(x_1)$ 과 $f_\delta(x_1+1)$ 을 얻고 대입함으로써 식 (9)를 풀이할 수 있다. 이때 얻어지는 데이터는 상수이므로 $f_\delta(x_1)$ 과 $f_\delta(x_1+1)$ 를 각각 f_{δ_1} , f_{δ_2} 로 간단히 표현한다. 식 (9)를 임의의 위치 x 에 대한 함수식 $F(x)$ 로 정의하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} F(x) = & [f_{\delta_1} - f_l(x)][(f_0(x+1) - f_l(x+1))] \\ & - [f_{\delta_2} - f_l(x+1)][(f_0(x) - f_l(x))] = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

따라서 $F(x) = 0$ 을 만족하는 x 를 풀이함으로써 광학계에서 발생한 부경 디스페이스 양을 추정할 수 있다.

3.2 틸트를 고려한 알고리즘

3.1절에서 파악한 특성에 의거하여 새로운 리포커싱 알고리즘을 개발하였다. 제안된 알고리즘은 보정 가능 범위의 이동 단계(1단계), 데이터 수집 단계(2단계),

보정 위치 계산 단계(3단계)의 3단계로 구성되며, 알고리즘의 개념도를 Figure 7에 나타내었다.

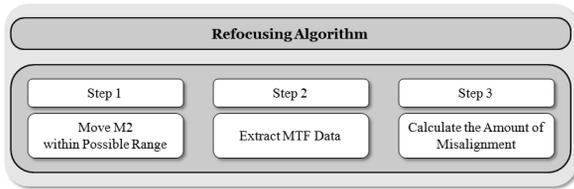


Fig. 7 Schematic of the Suggested Refocusing Algorithm

3.1절에서 가정한 위치 조건식 (8)은 부경에 부착된 포커스 메커니즘의 구동을 통해 수행될 수 있다. Figure 7에 나타낸 리포커싱 알고리즘의 세부 수행 과정은 다음과 같다.

Step 1 : 보정 가능 범위로의 이동

리포커싱 알고리즘의 보정 범위는 $\pm 30\mu\text{m}$ 이다. 하지만 앞서 파악한 함수 특성은 약 $\pm 11\mu\text{m}$ 범위에서만 성립한다. 따라서 식 (10)을 이용하기 위하여 해당 범위로의 부경 이동이 요구된다. 먼저 디스페이스 값 x 에 대하여 보정 범위인 $\pm 30\mu\text{m}$ 를 3구간으로 나누어 각 구간에 위치한 부경에 대하여 $\pm 11\mu\text{m}$ 범위로의 위치이동 후 2단계를 수행한다. A구간을 $-30\mu\text{m} \leq x < -11\mu\text{m}$, B구간을 $-11\mu\text{m} \leq x \leq 11\mu\text{m}$, 그리고 C구간을 $11\mu\text{m} < x \leq 30\mu\text{m}$ 라고 정의할 때, 각각 $+19\mu\text{m}$, $0\mu\text{m}$, $-19\mu\text{m}$ 만큼의 위치 이동을 수행하면 B구간 내에 위치할 수 있다.

현재 부경의 디스페이스가 B구간에 위치하는지 판단하기 위한 기준을 MTF 10%로 정하였다. Figure 6를 참고하였을 때 모든 틸트 발생 경우에 대하여 MTF 값이 10% 이상인 경우 B구간을 포함하므로 식 (10)의 활용이 가능하다. 따라서 부경 이동 여부 판단의 기준을 MTF 10% 이상을 만족하는지의 여부로서 결정할 수 있다.

MTF 값이 10% 이하인 경우 부경은 A구간 또는 C구간에 위치한다. B구간으로의 이동을 위하여 다음과 같은 과정을 거친다. 먼저 MTF 값이 10% 이하인 경우 $+19\mu\text{m}$ 의 위치 이동을 수행한다. 부경이 A구간 내에 있을 경우 이동 후 $-11\mu\text{m} < x < 8\mu\text{m}$ 내에 위치

하게 되며 이는 B구간에 해당한다. 하지만 부경이 C구간에 있을 경우 이동 후 $30\mu\text{m} < x < 49\mu\text{m}$ 내에 위치하게 된다. 따라서 첫 번째 이동 후 MTF 값을 측정하여 10% 이하인 경우 다시 $-38\mu\text{m}$ 의 위치 이동을 수행한다. 부경의 초기 위치가 C구간 내에 있었을 경우 이동 후 $-8\mu\text{m} < x < 11\mu\text{m}$ 내에 위치하게 되며 이는 B구간에 해당한다. 따라서 1단계에서는 부경이 A구간에 위치한 경우, B구간에 위치한 경우, C구간에 위치한 경우에 대하여 각각 1번, 0번, 2번의 위치 이동이 수행된다.

Step 2 : MTF 데이터 추출

식 (10)의 풀이에 필요한 데이터를 얻는 단계이다. B구간 진입 후 2개의 위치, 즉 x_1 , x_2 에서 MTF 데이터 추출이 필요한데, 이는 식 (5)와 같이 현 위치에서의 MTF 추출과 $+1\mu\text{m}$ 이동한 위치에서의 MTF 데이터 추출을 의미한다. 따라서 2단계에서의 부경의 위치 이동은 총 1번 수행된다.

알고리즘 구동 과정에서의 MTF 추출은 기존 온라인 리포커싱 알고리즘과 동일한 방법을 사용한다[13]. 별 영상 촬영을 통한 MTF 추출은 다음의 일련의 과정을 통해 수행된다. 먼저 위성의 자세제어를 통해 별 영상을 촬영하고, 얻은 영상의 잡음 제거 후 별 영상의 밝기 데이터를 추출한다. 밝기 데이터의 커브 피팅을 통해 PSF 함수를 얻을 수 있으며, 이를 푸리에 변환하여 MTF 값을 얻을 수 있다.

Step 3 : 디스페이스 계산

수집된 MTF 데이터를 이용하여 정렬 기준 위치로부터의 현 위치를 추정하는 단계이다. 1단계와 2단계를 거쳐 수집한 2개의 데이터를 식 (10)에 대입하여 부경에 발생한 디스페이스를 계산한다.

최종적으로 세 단계에서의 부경의 총 이동은 최소 3번, 최대 5번 수행되며 이에 따른 MTF 추출은 최소 4번, 최대 6번이 수행된다. 앞서 설명한 각 단계의 세부 구동 과정을 Figure 8에 순서도 형식으로 나타내었다.

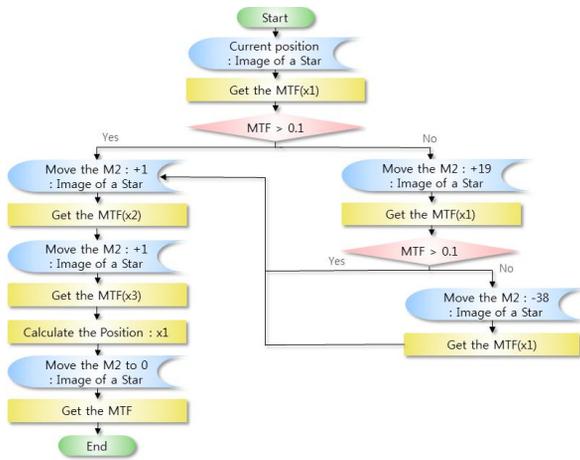


Fig. 8 Flow Chart of Supposed Refocusing Algorithm

3.3 제안된 알고리즘 성능 검증

앞서 제안된 알고리즘의 성능 검증을 위하여 CODE V와 MATLAB의 연동 시뮬레이션을 통해 오차 분석을 수행하였다. 시뮬레이션은 3.1 절에서 정의한 Case 1~7에 대하여 수행되었다. 보정 범위인 $\pm 30 \mu\text{m}$ 의 범위 내에서 각 Case에 대하여 정수의 디스페이스를 주어 수행하였다.

연동 시뮬레이션은 CODE V와 MATLAB의 입출력 파일을 주고받는 과정으로 수행되었다. CODE V는 Macro-PLUS 언어를 기반으로 한다. 따라서 리포커싱 알고리즘에서 출력되는 파일은 Macro-PLUS 언어로 구성된 파일이며 CODE V에 입력 시 부반사경의 위치 이동을 명령한다. CODE V로 명령이 입력되면 부경의 위치 이동이 가상으로 시뮬레이션되어 MTF 정보를 얻을 수 있다. CODE V에서 출력한 MTF 텍스트 파일을 다시 MATLAB에 입력하는 방식으로 시뮬레이션이 수행된다. 두 위치에 대하여 얻은 텍스트 파일에서 MTF 정보를 획득하여 알고리즘을 통해 틀어진 정도를 분석한다. 즉, MATLAB을 이용하여 MTF 데이터 수집과 보정 위치 계산을 수행하고 CODE V를 이용하여 광학 요소의 움직임을 모사하였다.

시뮬레이션의 결과를 Table 3에 나타내었으며 가장 틸트가 많이 발생한 Case 7에 대하여 오차분포를 Figure 9에 나타내었으며, Figure 10에 보정 전후를 비교한 이미지 시뮬레이션 결과를 나타내었다.

Table 3 Interconnected Simulation Results (Existing Algorithm & Suggested Algorithm)

	Existing Algorithm[13]			Suggested Algorithm		
	Max. *	Min. **	RMS E ***	Max. *	Min. **	RMS E ***
Case 1	0.1	-0.1	0.02	0.1	-0.1	0.03
Case 2	0.2	-0.6	0.15	0.1	-0.1	0.03
Case 3	0.8	-1.4	0.41	0.1	-0.1	0.03
Case 4	0.2	-1.6	0.16	0.1	-0.1	0.03
Case 5	0.9	-1.4	0.46	0.1	-0.1	0.05
Case 6	0.5	-1	0.27	0.1	-0.1	0.03
Case 7	1.4	-2	0.70	0	-0.1	0.03

*Maximum Error(μm)

**Minimum Error(μm)

***Root Mean Square Error(μm)

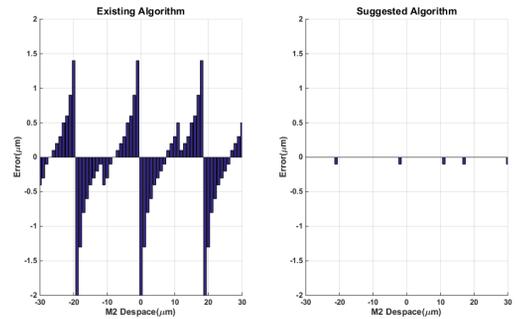
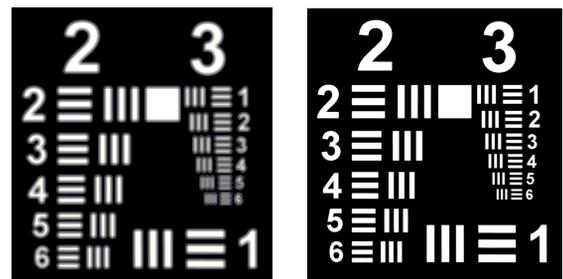


Fig. 9 Interconnected Simulation Results @Case 7



(a) Before Re-focusing (b) After Re-focusing

Fig. 10 Image Simulation Results

$\pm 200 \mu\text{rad}$ 범위의 틸트가 주어진 광학계에 대하여 제안된 알고리즘은 부반사경 관점의 디스페이스 $\pm 0.1 \mu\text{m}$ 이내로 리포커싱이 수행되는 것을 확인하였다. $\pm 0.1 \mu\text{m}$ 의 정렬오차를 광학계에 적용하여 MTF를 분석한 결과 0%의 성능저하를 나타내었다. 이는 본 연구에서 개발한 알고리즘을 적용하면 틸트가 발생한

광학계에도 최적 위치로의 위치 보정이 가능함을 의미한다.

4. 결 론

본 논문에서는 궤도상에서 자동 초점정렬을 위한 새로운 온라인 리포커싱 알고리즘을 제안하였다. 위성 카메라는 성능 보장을 위하여 마이크론 단위의 위치 정렬이 요구되므로 지상에서 광학 부품의 정밀한 정렬 과정을 거치게 되지만, 발사과정 및 운용 중 외부 환경에 의하여 비정렬이 발생하므로 리포커싱 과정이 반드시 필요하다. 이를 위하여 현재 위성에서는 궤도상에서 오프라인 리포커싱 과정을 수행하고 있으나 지상과의 통신을 통하여 이루어지므로 소요 비용 및 시간 측면에서 비효율적이다. 따라서 온보드 할 수 있는 리포커싱 알고리즘을 개발하여 궤도상에서 보정장치와 연동되어 자동으로 광학정렬을 수행하는 방법을 제안하였다.

기존의 리포커싱 과정은 디스페이스만이 발생한 광학계에 대하여 개발되었으나 본 논문에서는 틸트와 디스페이스가 동시에 발생한 광학계에 대한 영향을 고려하여 알고리즘을 개발하였다. 이는 현재 개발 추세인 소형 저가형 위성의 경우, 경통의 소재에 따라 디스페이스 변형뿐 아니라 비틀림, 수축 등의 변형이 가능하므로 이에 적절히 대응할 수 있는 리포커싱 알고리즘이다.

본 논문에서는 목표광학계 설계, 정렬오차에 따른 광학성능의 경향성 파악, 보정위치 계산을 위한 수식 전개, 리포커싱 알고리즘 개발, 성능 검증을 위한 시뮬레이션이 수행되었다. 설계된 광학계는 소형 위성용으로 주반사경 직경 200 mm을 가지도록 선정하였으며 슈미트-카세그레인 타입으로 고도 689 km에서 GSD 2.8 m, MTF 39.7%의 성능을 갖도록 설계되었다. 광학 설계 프로그램인 CODE V를 이용하여 설계한 광학계에서의 정렬오차에 따른 광학 성능 저하 경향을 파악하였다. 정렬 오차에 따른 MTF 데이터의 커브 피팅이 수행되었으며 얻어진 수학적 모델의 함수 특성을 파악하여 이를 알고리즘에 적용하였다.

제안한 알고리즘은 궤도상에서 지상과의 통신 없이도 광학정렬이 가능하도록 하였다. 이는 온보드된 알고리

즘을 통해 촬영된 별 영상의 자동 분석을 수행함으로써 MTF를 추출하여 이루어질 수 있다. 원하는 위치에서의 MTF 정보를 읽기 위하여 포커스 메커니즘과의 연동이 이루어지고 얻어진 데이터를 이용하여 보정 위치를 계산한다. 연동 시뮬레이션을 통해 최소 2번 최대 4번의 영상 촬영으로 부분사경 디스페이스 $\pm 30 \mu\text{m}$ 범위에 대하여 $\pm 0.1 \mu\text{m}$ 의 정확도로 정렬이 가능함을 확인하였다. 제안된 알고리즘은 부경에 $\pm 200 \mu\text{rad}$ 범위의 틸트가 발생한 광학계에 적용 시 기존 알고리즘에 비하여 리포커싱 성능이 매우 우수함을 확인하였다.

후 기

본 논문은 국방광역감시 특화연구센터 프로그램의 일환으로 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] J. Foust, "Emerging opportunities for low-cost small satellites in civil and commercial space," 24th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, 2010.
- [2] S. Lee and J. Song, "High resolution science observation satellite development trend," *Science & Technology Policy* 106, pp. 77-87, 1998.
- [3] Y. Jang, M. Park, S. Yu, S. Park, and G. Choe, "The trend and prospect of small satellite formation flying technology," *Journal of The Korean Society for Aeronautical & Space Sciences* Vol. 31, No. 7, pp. 136-149, 2003.
- [4] A. Meygret, and D. Leger, "In-flight refocusing of the SPOT-1 HRV cameras," *Proceedings of SPIE* 2758, pp. 209-307, 1966.
- [5] D. Leger, F. Viallefont, E. Hillairet, and A. Meygret, "In-flight refocusing and MTF assessment of SPOT5 HRG and HRS cameras," *Proceedings of SPIE* 2758, pp. 224-231, 2003.
- [6] V. Amberg, L. Bernard, and C. Latry, "Star-based defocus computing technique for PLEIADES-HR

- satellites,” *Proceedings of SPIE 9643*, 9643-03, 2015.
- [7] B. C. Braam, H. A. Van Mierlo, G. Buvril, and S. Gill, “Meteosat Second Generation refocusing mechanism,” in *Proceedings of 7th European Space Mechanisms and Tribology Symposium*, B. H. Kaldeich-Schürmann 410, p. 27, 1997.
- [8] M. W. Werner, T. L. Roellig, F. J. Low, G. H. Rieke, M. Rieke, W. F. Hoffmann, E. Young, J. R. Houck, B. Brandl, G. G. Fazio, J. L. Hora, R. D. Gehrz, G. Helou, B. T. Soifer, J. Stauffer, J. Keene, P. Eisenhardt, D. Gallagher, T. N. Gautier, W. Irace, C. R. Lawrence, L. Simmons, J. E. Van Cleve, M. Jura, E. L. Wright, and D. P. Cruikshank, “The Spitzer space telescope mission,” *The Astrophysical Journal Supplement Series* Vol. 154, No. 1, pp. 1-9, 2004.
- [9] M. Lee, J. Kim, J. Chang, and M. Kang, “Development of in-orbit refocusing mechanism for SpaceEye-1 electro-optical payload,” *Proceedings of SPIE 9972*, 9972-10, 2016.
- [10] J. Jang, J. Kim, S. Yang, M. Kang, and E. Kim, “Development of thermal control system for high resolution earth observation camera,” *Proceedings of The Spring Conference of Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, No. 4, pp. 889-893, 2014.
- [11] D. Lee, Y. Youk, J. Yeon, S. Jang, and E. Lee, “Refocus mechanism development for high resolution electro-optical camera,” *Proceedings of The Autumn Conference of Korean Society Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, No. 11, pp. 553-555, 2014.
- [12] D. Kim, Y. Choi, M. Kang, E. Kim, and H. Yang, “Optical alignment of a high-resolution optical earth observation camera for small satellites,” *Korean Journal of Optics and Photonics* Vol. 15, No. 4, pp. 391-396, 2004.
- [13] J. Jo, J. Hwang, and J. Bae, “Online refocusing algorithm for a satellite camera using stellar sources,” *Optics Express* Vol. 24, No. 5, pp. 5411-5422, 2016.
- [14] R. D. Gehrz, E. A. Romana, W. F. Hoffmann, J. P. Schwenker, J. E. Mentzell, J. L. Hora, P. R. Eisenhardt, B. R. Brandl, L. Armus, K. R. Stapelfeldt, D. C. Hines, A. K. Mainzer, E. T. Young, and D. G. Elliott, “The state of the focus and image quality of the Spitzer Space Telescope as measured in orbit,” *Proceedings of SPIE 5487*, pp. 166-176, 2004.
- [15] H. G. J. Rutten and M. A. M. van Venrooij, “*Telescope Optics: A Comprehensive Manual for Amateur Astronomers*,” Willmann-Bell, 1999.